

Martin STOLÁRIK¹, Miroslav PINKA²

SEIZMICKÁ ODEZVA TRHACÍCH PRACÍ NA MĚLCE RAŽENÉM TUNELU

SEISMIC RESPONSE OF BLASTING OPERATION IN SHALLOW TUNNEL

Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá analýzou výsledků z experimentálního seizmického měření dynamické odezvy trhacích prací v mělce raženém železničním tunelu Tomice II (součást IV. železničního koridoru) v malé vzdálenosti, tj. první desítky metrů, a prezentací výsledků matematického modelu dané problematiky. K výstavbě jmenovaného tunelu byla použita Nová rakouská tunelovací metoda. Součástí technologického procesu ražby u této metody je i rozpojování hornin za pomoci trhacích prací. Experimentální měření bylo prováděno na povrchu nad raženým tunelem ve vzdálenosti 8,5 m až 50 m od čelby přes masiv. Matematický model byl vytvořen programem Plaxis 2D za pomoci dynamického modulu. Výstupy matematického modelu byly konfrontovány s výsledky měření in-situ. V příspěvku jsou také publikovány analýzy zaznamenaných vlnových obrazů a to jak v amplitudové tak i frekvenční oblasti.

Klíčová slova

Seizmické měření, matematický model, tunel, trhací práce.

Abstract

This contribution deals with analysis of results that were obtained during seismological measurement of dynamic response of firing explosives performed in shallow railway tunnel named Tomice II (part of railway corridor IV) in near distances, i.e. the distances of first ten meters. Example of numerical modelling of given situation is also presented. The New Austrian Tunnelling Method was used for driving of the tunnel. Shooting and blasting was used as part of driving technology. Experimental measurement was realized on the surface above driven tunnel in distance range 8.5 m – 50 m from the face. Numerical model was created in Plaxis 2D software using dynamic module. Results from this model were compared with in-situ measurements. Analyses of measured wave patterns are also presented both in time and frequency domains.

Keywords

Seismic measurement, mathematical model, tunnel, blasting operation.

1 ÚVOD

Studium seizmických vlivů, vznikajících při provádění trhacích prací obecně a při realizaci mělce vedených podzemních děl obzvlášť, je stále aktuální s ohledem na realizace dalších tunelových a jiných podzemních staveb. S tím souvisí také seizmická měření, a to nejen ta rutinní v rámci běžného monitoringu, která jsou prováděna během výstavby podzemních staveb, ale také měření

¹ Ing. Martin Stolárik, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 928, e-mail: martin.stolarik@vsb.cz.

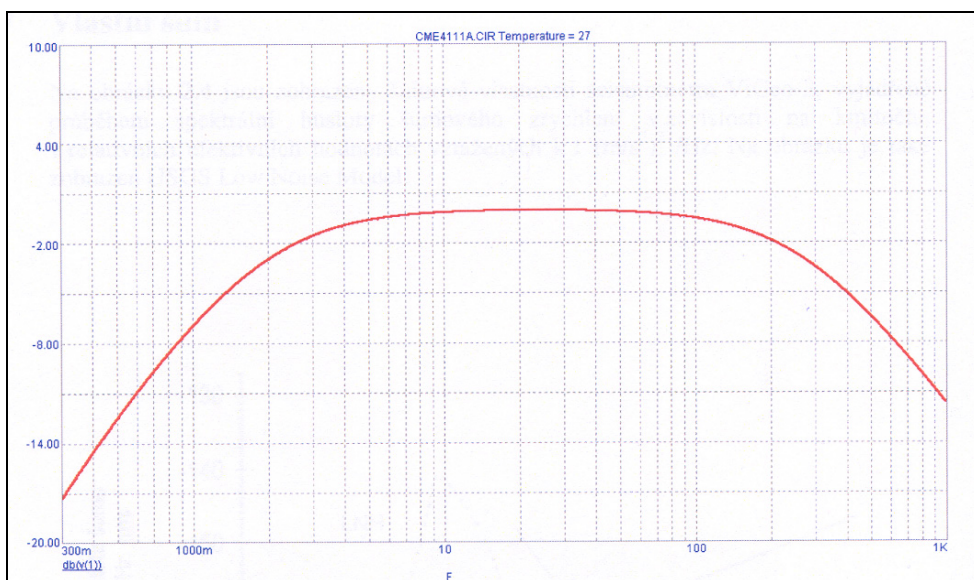
² Ing. Miroslav Pinka, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 928, e-mail: miroslav.pinka.st@vsb.cz.

experimentální, tedy měření mimo referenční stanoviště dané normou ČSN 73 0040 [1, 2]. Tento příspěvek se bude zabývat matematickým modelováním a experimentálním seizmickým měřením odezvy trhací práce a to včetně příslušných analýz. Měření bylo realizováno v průběhu ražby železničního tunelu Tomice II. Tento tunel budovaného IV. železničního koridoru je součástí transevropské železniční magistraly E55 vymezené na našem území trasou Děčín státní hranice – Praha – České Budějovice – Horní Dvořiště státní hranice. Úsek trati Votice – Benešov u Prahy, patřící ke IV. železničnímu koridoru, byl zbudován kolem roku 1870 jako jednokolejný. Mezi Voticemi a Benešovem probíhaly po vzniku Československa práce na zdvoukolejnění tohoto úseku trati, ty však nebyly dokončeny a trať zde zůstala pouze jednokolejná. Na tomto úseku, který je dlouhý 18,3 km, je nyní v rámci stavby Modernizace trati Votice – Benešov u Prahy plánováno zbudování celkem pěti tunelů: hloubený Votický (590 m) a čtyři tunely ražené Olbramovický (480 m), Zahradnický (1044 m), Tomice I (324 m) a Tomice II (252 m). Všechny tunely jsou projektovány jako dvojkolejné s návrhovou rychlostí 150 km/hod., respektive 160 km/hod. Zahradnický tunel je vzhledem ke své délce vybaven i únikovou štolou a šachtou. Výstavba byla zahájena v srpnu 2009, termín dokončení je plánován na prosinec 2013 [3].

2 EXPERIMENTÁLNÍ SEIZMICKÉ MĚŘENÍ A ANALÝZA ZÍSKANÝCH DAT

Všechna měření byla prováděna seizmickými aparaturami Gaia2 a Gaia2T se senzory ViGeo2 (obojí vyrábí firma Vistec Praha). Aparatura Gaia2 resp. Gaia2T je tříkanálová seizmická stanice s dynamickým rozsahem 138dB_{p-p} s možností spouštěného i kontinuálního záznamu digitálních dat. Časová synchronizace je zajištěna pomocí modulu GPS.

ViGeo2 je kompaktní, aktivní, krátkoperiodický, tříoskový, rychlostní seismometr, pro terénní i staniční použití. Seismometr obsahuje tři mechanické kmitavé systémy (snímače) s vlastní frekvencí 2 Hz a frekvenční rozsah je od 2 Hz do 200 Hz. Frekvenční charakteristika senzoru ViGeo2 je na obrázku 1.



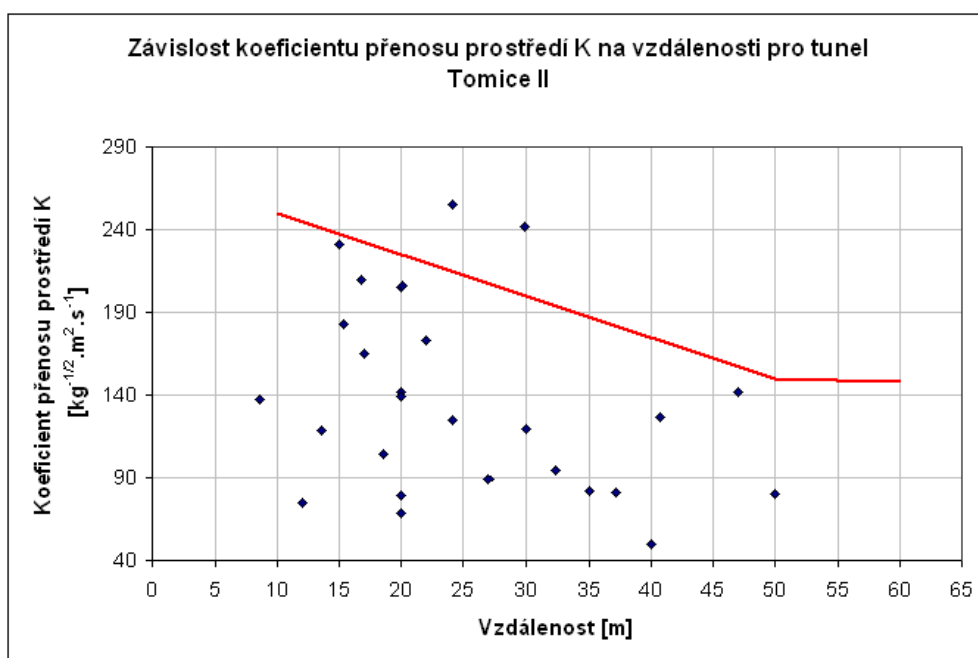
Obr. 1: Frekvenční charakteristika senzoru ViGeo 2 (Vistec, Praha)

Ke zpracování seizmických dat byl použit program SWIP (Seismic Waves Interpretation Program) dodávaný standardně firmou Vistec Praha k aparaturám Gaia. V tomto programu je možné seizmický signál zpracovávat jak v amplitudové, tak ve frekvenční oblasti. V amplitudové oblasti zpracovatelský software neumožňuje přepočtení hodnot amplitud kmitání na fyzikální jednotky

[mm.s⁻¹], proto jsou ve všech obrázcích vlnových obrazů svislé osy vyneseny v kvantovacích úrovních [cnt]. Převodní vztah: 1cnt = 2,975.10⁻⁶ mm.s⁻¹ (více [4]).

Vlastní experimentální seizmická měření byla prováděna při trhacích pracích prováděných na kalotě mezi staničením 168,2 a 175,7 na tunelu Tomice II. Na povrchu nad tunelovou troubou (nadloží cca 7 m) bylo realizováno celkem 27 měření se senzory umístěnými ve vzdálenosti 13,5 m až 50 m od čelby. Ve všech případech se jednalo o trhací práce s celkovou náloží 82 kg a s mezní náloží na jeden časový stupeň 4,8 kg. Vývrty byly vrtány ve směru osy díla a záběr byl 1,5 m.

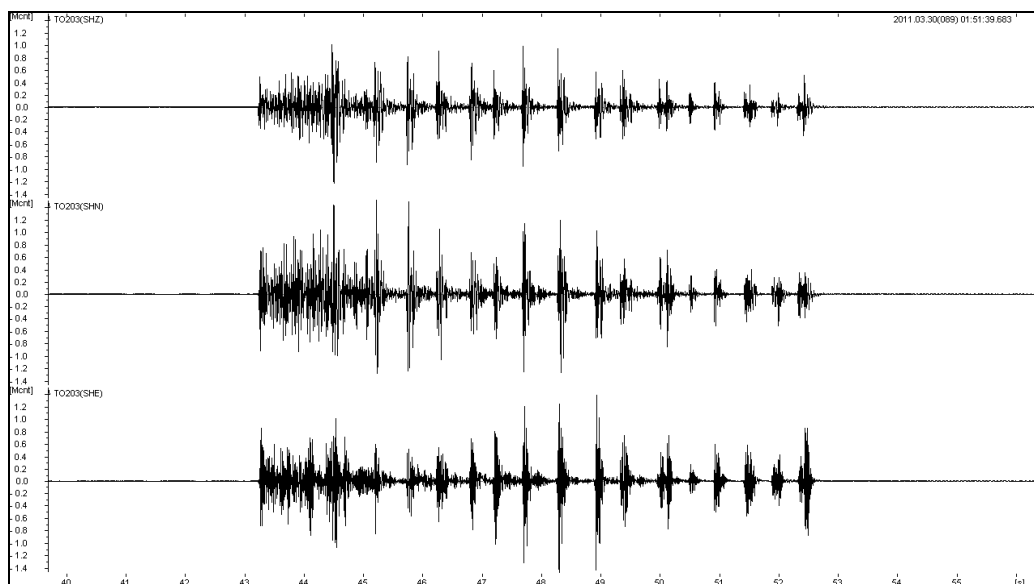
Pro zpracování celého souboru dat byla zvolena metodika, při níž jsou odečteny maximální hodnoty amplitud rychlosti kmitání na jednotlivých složkách (vertikální, horizontální radiální a horizontální transversální) a následně je dopočítána složka prostorová podle vztahu $v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{0,5}$ [5]. Z dopočítaných prostorových složek maximálních amplitud rychlosti kmitání byly následně spočítány konstanty přenosu prostředí K pro blízkou zónu tunelu Tomice II podle Langeforsova empirického vztahu ve tvaru $v_{max} = K \cdot (Q^{0,5}/l)$ obecně používaném normou ČSN 73 0040 (jiné podoby tohoto vztahu [6, 7]). Na základě této normy byly pak do grafu vyneseny teoretické koeficienty K (mezilehlé koeficienty K byly interpolovány po přímce) v závislosti na vzdálenosti od zdroje dynamického namáhání (červená křivka). Tyto normové koeficienty byly konfrontovány se spočítanými konkrétními koeficienty přenosu prostředí K pro daný tunel (Graf 1).



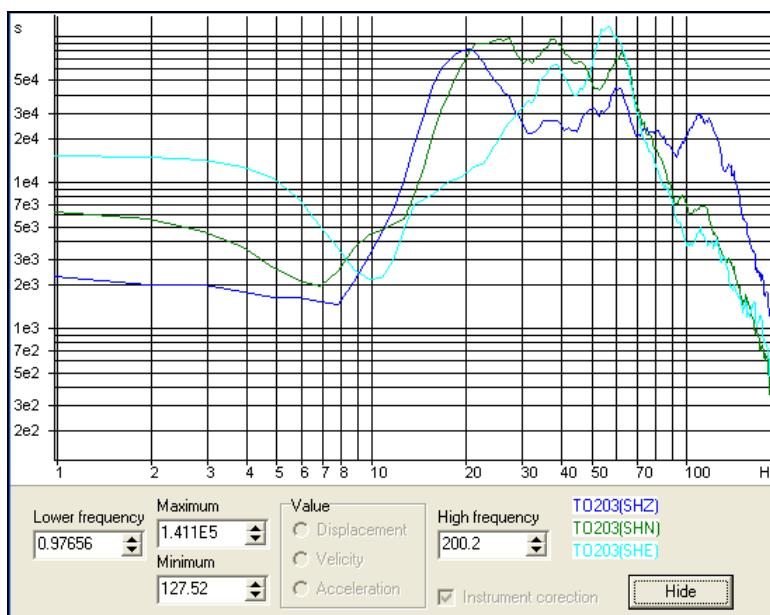
Graf 1: Závislost koeficientu přenosu prostředí K na vzdálenosti pro tunel Tomice II – konfrontace s ČSN 73 0040

Příklad záznamu vlnového obrazu naměřeného na povrchu a příklad frekvenčního spektra k danému záznamu je uveden na obrázku 2 resp. 3. Na obrázku 2 jsou shora dolů zobrazeny složky vertikální označená SHZ, dále složka horizontální radiální SHN (směřovaná ve směru vedení tunelu) a transversální SHE, vodorovná osa je čas v sekundách (osy jsou ve stejném amplitudovém i časovém měřítku). Na záznamu je na všech třech osách zřetelně vidět časování trhací práce do jednotlivých časových stupňů, vyvolané vibrace jsou po odstřelech jednotlivých stupňů téměř utlumeny. Délka celého záznamu odpovídá časovému rozsahu prováděné trhací práce a je cca 10 s. Na obrázku 3 se nachází výrazný pík ve spektru svislé složky na frekvenci 20 Hz, méně výrazný pak na frekvencích

60 a 110 Hz. Převládající frekvence ve spektru horizontální složky radiální je v rozsahu 20 – 60 Hz a ve spektru složky horizontální transversální v rozsahu 40 – 70 Hz.

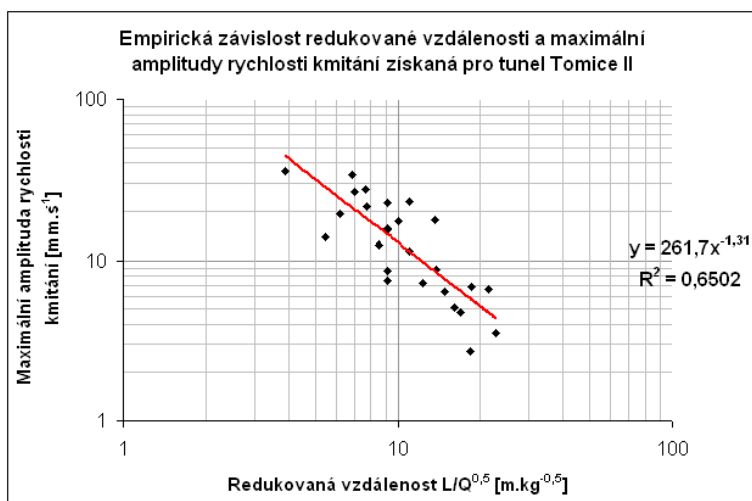


Obr. 2: Příklad vlnové obrazu záznamu trhačí práce na tunelu Tomice II



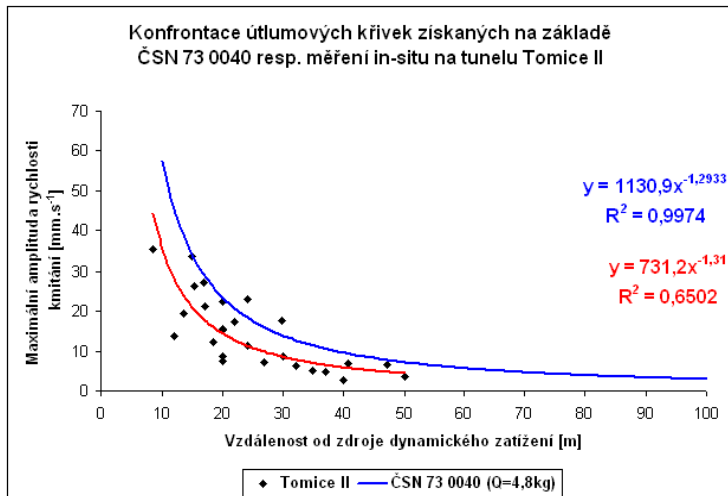
Obr. 3: Příklad frekvenčního spektra záznamu trhačí práce na tunelu Tomice II

Získané záznamy z jednotlivých odstřelů jsou si navzájem velmi podobné, a to v časové i spektrální oblasti. To vede k závěru, že data z realizovaného měření je možno použít k zobrazení Langeforsova empirického vztahu do grafické závislosti. Výrazné změny v zaznamenaných datech by zřejmě ukazovaly na významné změny v lokální geologii či registraci různých typů vln. Získaná závislost hodnot maximálních prostorových složek kmitání na redukované vzdálenosti je představena v grafu 2.



Graf 2: Empirická závislost redukované vzdálenosti a maximální amplitudy rychlosti kmitání získaná pro tunel Tomice II

Na základě parametrů prováděných trhacích prací byla vynesena podle ČSN 73 0040 teoretická útlumová křivka (závislost maximální amplitudy rychlosti kmitání na vzdálenosti od zdroje dynamického namáhání) pro dané prostředí a pro danou příslušnou mezní nálož. Tato křivky (v grafu modře) byla konfrontována s reálnými hodnotami naměřenými in-situ na námi sledovaném tunelu (maximální amplituda kmitání – prostorová složka) resp. získanou reálnou útlumovou křivkou (v grafu červeně) (Graf 3).



Graf 3: Konfrontace útlumových křivek získaných na základě ČSN 73 0040 resp. měření in-situ na tunelu Tomice II

3 MATEMATICKÝ MODEL

Matematický model dané problematiky představený v tomto příspěvku byl realizovaný v programu Plaxis 2D [8]. Programový systém Plaxis byl vyvinut pro statickou i dynamickou analýzu napětíodeformačního stavu v geotechnických úlohách. Systém je založen na numerické metodě konečných prvků. Nástavbový dynamický modul umožňuje řešit úlohy týkající se jak dynamických vlivů v důsledku lidské činnosti (technická seizmicita), tak i vlivů přirozené seizmicity. Při tvorbě

dynamického modelu je obecný postup analogický jako v případě statické analýzy, zahrnuje zadání geometrie modelu, hraničních podmínek, generaci sítě a zadání počátečních podmínek. V závislosti na typu řešené úlohy se volí základní typ modelu (rovinné přetvoření nebo axisymetrický model). Do základního nastavení patří rovněž zadání parametrů určujících výšku a délku modelu, zadání gravitačního zrychlení a používaných fyzikálních jednotek. Při modelování seizmických vlivů je vždy nutno do výpočtu kromě standardních geometrických hraničních podmínek (nejčastěji tzv. tuhá vana), omezující na hranici posuny v příslušném směru, zavést rovněž podmínky absorbce na hranici. Bez zavedení absorbčních podmínek by docházelo k nereálnému odrazu seizmických vln zpět do modelu a k jejich vzájemné interakci. Pro axisymetrický model se tento typ hraničních podmínek zadává pro pravou a spodní hranici modelu. V případě modelování zemětřesných jevů (rovinné přetvoření) se hraniční podmínky zadávají na obou bočních a na spodní hranici modelu.

V případě modelování dynamických vlivů je nutno kromě základních charakteristik horninového prostředí zadat rychlosti šíření vln v horninovém prostředí a charakteristiky materiálového tlumení (tzv. Rayleighovy parametry tlumení alfa a beta). Pro osově symetrický model (zjednodušená geometrie, viz níže) je často dostačující uvažovat pouze tzv. geometrické tlumení, plynoucí z radiálního šíření vln prostředím a materiálové tlumení lze v tomto případě zanedbat (Rayleighovy koeficienty tlumení jsou nulové).

Dynamické zatížení může být v tomto výpočetním systému zadáno:

- 1) Charakteristikami harmonického kmitání (amplituda, frekvence kmitání a fázový posun) (Obr. 4);
- 2) Načtením příslušných časových hodnot posunů, rychlostí, případně zrychlení z ASCII souboru nebo ze souboru SMC (Obr. 5).

Kromě těchto uvedených charakteristik se zadává časový interval Δt , po který působí toto dynamické zatížení.

V případě řešení problematiky dynamické odezvy trhacích prací je silový účinek spočítán za použití vztahu profesorky Fotieové pro dynamické zatížení p_{dyn} , [9]

$$p_{dyn} = \frac{1}{2\pi} \cdot Kc \cdot \gamma \cdot c_p \cdot To [kPa]$$

kde

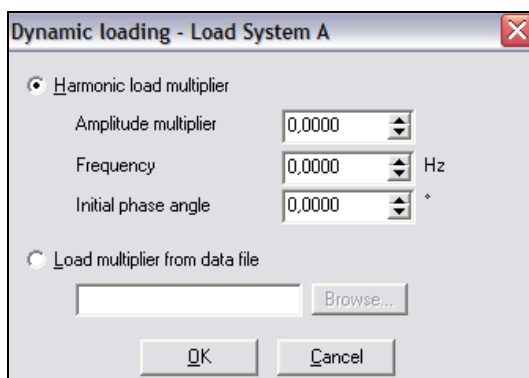
Kc – koeficient seizmicity ($Kc = 0,025 - 0,1$; rozmezí odpovídá bořivému efektu seizmických vlivů a byla přijata z důvodu bezpečnosti)

γ – objemová tíha

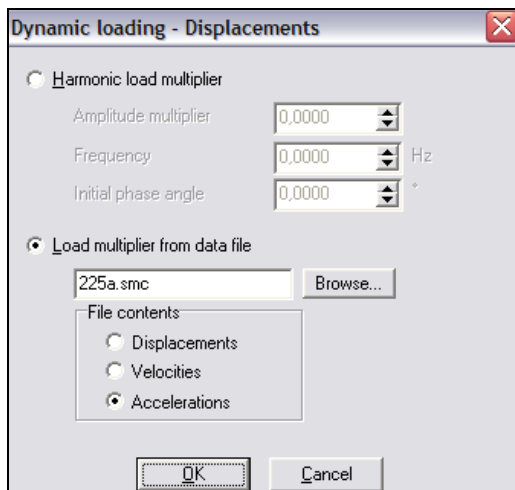
To – převládající perioda seizmických kmitů horninových částic

c_p – rychlost šíření podélných vln

Frekvence kmitání se zadává na základě experimentálního seizmického měření a fázový posun není uvažován, protože zavedení fázového posunu nepůsobuje změny.



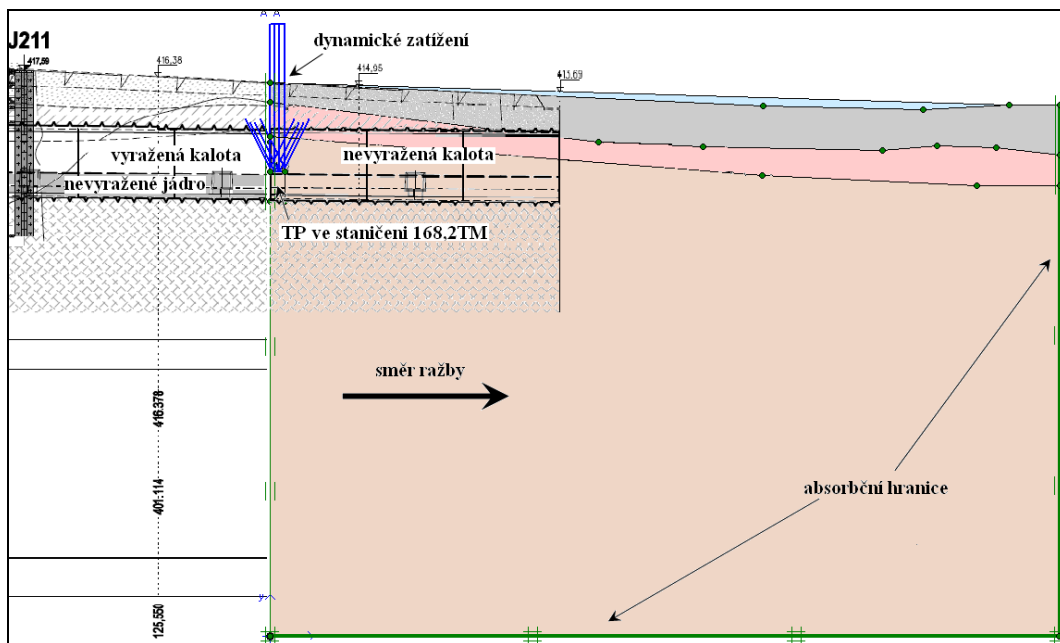
Obr. 4: Zadání dynamického zatížení charakteristikami harmonického kmitání



Obr. 5: Zadání dynamického zatížení ze souboru SMC

Vlastní zatížení simulující trhací práci je v geometrii modelu umístěno ve formě rovnoměrného spojitého zatížení v místě kaloty. Doba působení dynamického zatížení vyplynula z převládající frekvence získané z experimentálních měření, tedy $T = 1/f$ [s]. Tento postup byl již několikrát ověřen a aplikován na několika jiných příkladech (např. [10, 11]).

V případě tunelu Tomice II bylo cílem namodelovat útlumovou křivku na povrchu nad realizovaným tunelem. Geometrie modelu v podélném řezu tunelu (Obr. 6) a parametry hornin (Tab. 1) byly zaimplementovány na základě projektové dokumentace poskytnuté firmou Subterra - podélný profil a sonda J211 [12, 13].



Obr. 6: Geometrie matematického 2D modelu na základě projektové dokumentace

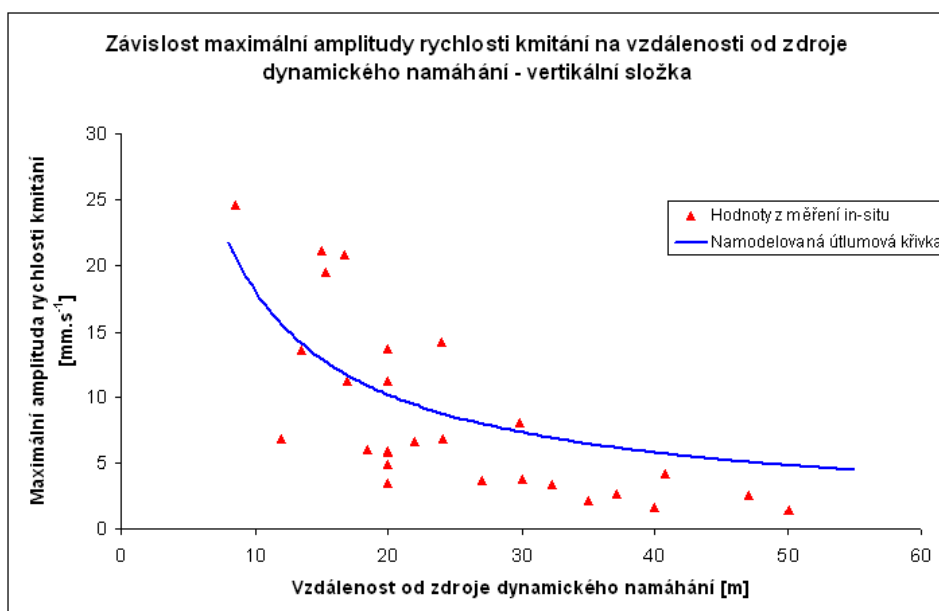
Tab. 1: Parametry horninového prostředí – tunel Tomice II

Typ horniny	γ	ν	E	c	ϕ	Model	
	[kN/m ³]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]		
Kvartérní pokryv	19	0,35	8000	16	25		γ ... objemová tíha zeminy
C1G, C2G	27,9	0,25	30000	80	40		ν ... Poissonovo číslo
C3G	27,9	0,2	250000	80	40		E... modul pružnosti
C4G	27,9	0,25	650000	80	40		ϕ ... úhel vnitřního tření
							c... soudržnost

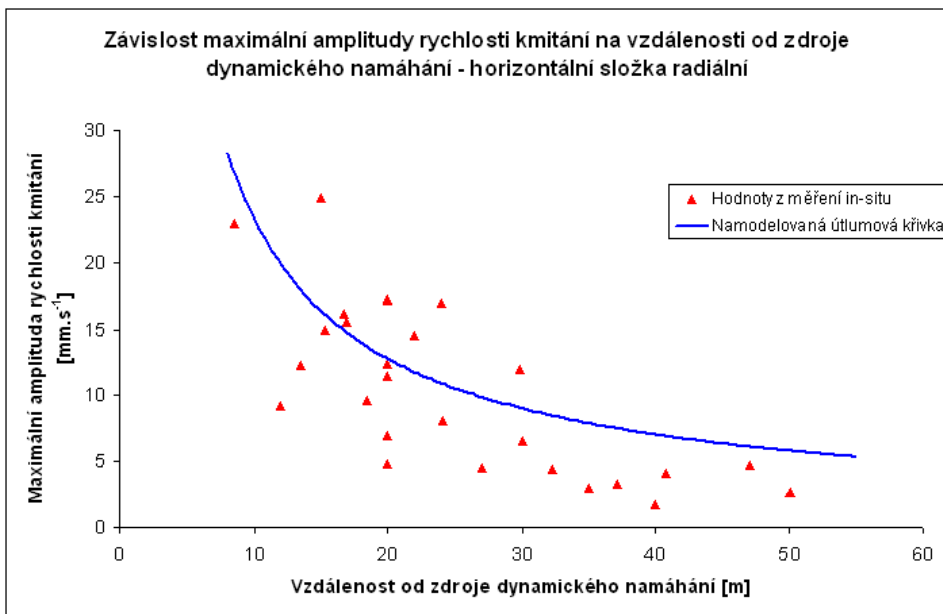
Horninový masiv je ve sledovaném úseku tvořen granitoidy. Horniny skalního podkladu jsou postiženy prakticky všemi stupni zvětrání (zcela a silně zvětralé – C1G a C2G; mírně zvětralé – C3G; navětralé – C4G). Kvartérní pokryv je v trase tunelu zastoupen pouze velmi omezeně a mělko pod povrchem přechází do písčitých zvětralin skalního podkladu. Převažujícím typem zemin je tuhá až pevná písčitá hlína, krytá hnědou slabě humózní písčitou hlínou. Tunel je veden mělce pod povrchem, nadloží se v tomto úseku pohybuje kolem 6 m až 8 m. V modelu nebylo uvažováno s hladinou podzemní vody, neboť hladina zde není souvislá. Spíše se zde jedná o lokální zvodně, vázané na izolované systémy náhodně propojených, nezajílovaných puklin, které prostupují zcela nepropustným pevným masivem [14].

Koeficient dynamického zatížení byl spočítán za použití vztahu Fotieové (Amplitude multiplier = 3,1249). Frekvence kmitání byla do matematického modelu zavedena na základě frekvenční analýzy pořízené z reálného záznamu průběhu rychlosti kmitání získaného při experimentálním měření (Frequency = 40 Hz). Doba působení dynamického zatížení byla 0,025 s.

V matematickém modelu byla sledována maximální amplituda rychlosti kmitání ve směru vertikálním a ve směru horizontálním radiálním (s ohledem na vedení tunelu) a to na povrchu ve směru ražby tunelu. Ve vzdálenosti 8 m až 55 m od dynamického zatížení bylo na modelovaném povrchu rozmístěno 10 bodů a na základě hodnot maximálních amplitud rychlosti kmitání v těchto bodech byly sestaveny útlumové křivky pro oba příslušné směry a tyto křivky byly konfrontovány s reálnými hodnotami naměřenými během experimentálního měření (Graf 4, 5).



Graf 4: Konfrontace reálných hodnot maximálních amplitud rychlosti kmitání s namodelovanou útlumovou křivkou pro tunel Tomice II – vertikální směr



Graf 5: Konfrontace reálných hodnot maximálních amplitud rychlosti kmitání s namodelovanou útlumovou křivkou pro tunel Tomice II – horizontální směr radiální

4 ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá dynamickými účinky trhacích prací vyvolaných při ražbě mělce pod povrchem vedeného tunelu. Problematika byla řešena jak z pohledu experimentálního seizmického měření in-situ a analýz naměřených dat, včetně analýzy koeficientu přenosu prostředí, tak z pohledu matematického modelování dynamických účinků trhací práce.

Matematický model byl realizován programem Plaxis 2D. S přijetím určitých zjednodušení a akceptováním některých nedokonalostí dvojdimenzionálního modelu zde byla ověřena použitelnost tohoto programu pro řešení daných dynamických úloh. Autor si je vědom jistých omezení a nedokonalostí dvojdimenzionálního rotačně symetrického modelu oproti reálné situaci. Dynamické zatížení bylo v matematickém modelu zadáno za pomoci vzorce Fotievvé. Tento vzorec však nezahrnuje parametry konkrétní prováděné trhací práce (mezní nálož), pouze parametry prostředí, v kterém je trhací práce prováděna. Celková geometrie modelu byla kvůli náročnosti výpočtu zjednodušená v geologii a některé aspekty, jako např. tektoniku nelze za pomoci tohoto programu vůbec zohlednit. To vede ke zjednodušení a zrychlení celého výpočtu, ale také k jisté nepřesnosti. V modelu také nelze zahrnout různé anomálie, které jsou pravděpodobně způsobeny buďto lokální geologickou anomálií nebo nedodržením pasportu trhacích prací (např. přebitím nálože).

Navrhovaný postup ukazuje, že i přesto lze dosáhnout dostatečné shody mezi reálnými hodnotami maximálních amplitud rychlosti kmitání naměřenými in-situ během experimentálního měření na povrchu nad raženým tunelem a hodnotami spočítanými matematickým modelem. Takovýto matematický model může být součástí projektové dokumentace tunelu, resp. podzemní stavby a sloužit jako podklad pro pasport trhacích prací (dimenzování mezní nálože) a případná opatření v rámci realizované stavby s ohledem na povrchovou zástavbu. Popřípadě mohou být výsledky matematického modelu součástí inverzní analýzy geotechnického monitoringu a jako podklad pro měření seizmické odezvy trhacích prací (možná očekávaná maximální amplituda, volba rozsahu aparatury a spouštěcí úrovně, výběr sledovaných objektů na povrchu).

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován v rámci projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0013 „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO“

LITERATURA

- [1] KALÁB, Z.: *Seismická měření v geotechnice*. Monografie. 2008, 125 stran. Ostrava.
- [2] PANDULA, B. a KONDELA, J.: *Metodológie seizmiky trhacích prác*, Slovenská spoločnosť pre trhacie a vŕtacie práce – ZSVTS, 2010, 156 stran. Bánská Bystrica.
- [3] ŠPONAR, R. a KOSSLER, M.: Ražba tunelů na dopravní stavbě Modernizace trati Votice-Benešov u Prahy. *Tunel*. 2010, roč. 19., č. 3, s. 14-21. Praha.
- [4] WISZNIOWSKI, J., WIEJACZ, P.: *Program SWIP*, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 2003, s. 36, Warszawa.
- [5] STOLÁRIK, M.: Results of Seismic Measurement in Tunnels on the Railway Corridor IV. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Construction Series*. 2011, XI, č. 2, s. 10. ISSN 1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-011-0031-x. Dostupné z: <http://versita.metapress.com/content/h2874521r3783101/?p=3092e88d91ed43e0aebeacd7f9074f05&pi=16>
- [6] BONGIOVANNI G.: Experimental studies of vibrations caused by blasting for tunnel excavations. In: *Earthquake, blast and impacts: Measurements and effects of vibration*, Elsevier Applied Science, 1991, 201-210.
- [7] SARSBY, R.: *Environmental Geotechnics*. Thomas Telford Limited, 2000, London.
- [8] BRINKGREVE, R. B. J.: *PLAXIS 2D manual*, 2002, Delf University of Technology & PLAXIS b.v., A.A. Balkema Publisher, The Netherlands.
- [9] BULYČEV, N. S.: *Mechanika podzemnych sooruzenij*, Nedra, 1988, Moskva.
- [10] STOLÁRIK, M.: Problematika modelování dynamického zatížení v programovém systému Plaxis 2D, *Ph.D. Workshop 2007 Proceedings*, (R.Blaheta, A.Kolcun eds.), IG AS CR, Ostrava 2007, 63-68.
- [11] STOLÁRIK, M.: Matematické modelování dynamických účinků trhacích prací programovým systémem Plaxis 2D, *Ph.D. Workshop 2008 Proceedings*, (R.Blaheta, A.Kolcun eds.), IG AS CR, Ostrava 2008, 60-64.
- [12] VELEBIL, J.: Modernizace trati Votice-Benešov u Prahy, zpřesnění technických řešení SO 86-25-03 Tomický tunel II, *Ražba a primární ostění – Podélný řez tunelem*, SUDOP Praha a.s., 2010, Praha.
- [13] TOMEČEK, V. a LEŠNER, J.: *Geologická dokumentace vrtané sondy J211*, SUDOP Praha a.s., 2009, Praha.
- [14] GRAMBLIČKA, M., MÁRA, J., MAŘÍK, L.: Nové železniční tunely na traťovém úseku Votice-Benešov. *Tunel*. 2008, roč. 17., č. 1, s. 41-47. Praha

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. RNDr. Blažej Pandula, CSc., Ústav geovied, Fakulta BERG, TU v Košiciach.

Prof. Ing. Karel Müller, DrSc., Ostrava.